

論文 衝撃的載荷重を受ける RC 柱の動的挙動に関する実験

佐藤 昌志^{*1}・小山田 欣裕^{*2}・谷本 俊充^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：RC橋脚の動的挙動に関する研究として、橋脚模型を乗せた台車を緩衝工を有するコンクリート壁に衝突させることにより、衝撃的載荷荷重を基部に入力し、死荷重としてのおもりの応答加速度を測定することによってRC橋脚の破壊を含む動的特性を実験で検討した。その結果、(1)本実験方法は、RC橋脚の動的挙動を把握する場合において比較的有用な方法であること、(2)入力加速度に対する応答加速度までの伝達機構が把握できたこと、(3)1箇所塑性ヒンジが形成されるとその部分のみの損傷度が大きくなること等が実験の結果として判明してきた。

キーワード：RC柱、橋脚、動的挙動、実験手法

1. はじめに

1982年3月に発生した北海道浦河沖地震により一般国道235号静内橋の橋脚の段落し部にせん断破壊が生じ復旧に相当の期間を要した。このことを一つの契機に、橋脚の耐震設計が飛躍的に向上したといっても過言でない。その後の大地震においても相当数の橋梁橋脚は大きな損傷を受けてきているが、1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、落橋に至る橋梁橋脚の損壊が発生し社会基盤施設の多くが失われた。

著者らは、兵庫県南部地震で記録した神戸海洋気象台の波形と近年北海道で発生したマグニチュード8クラスの強震記録波形とを比較分析したところ、その結果として神戸海洋気象台で得られた記録では最大変位、最大速度では北海道釧路沖地震で得られた温根沼大橋で記録したものより小さいものの、最大加速度が大きいことおよび変位の立ち上がりが非常に早いことが特徴として挙げられると推察している。このことから、神戸海洋気象台の強震記録を衝撃的地震動と位置づけ、橋脚供試体を台車に乗せたまま緩衝工を設けたコンクリート壁に衝突させて応答加速度および変位、さらには供試体の破壊性状を実験的に検討した。

2. 温根沼大橋と神戸海洋気象台の強震記録

図-1に1993年に発生した釧路沖地震時の一般国道44号温根沼大橋で記録した加速度記録と、神戸海洋気象台の加速度波形を、図-2には同記録の変位波形を示した。温根沼大橋で記録した加速度記録は最大加速度で363gal、地震の継続時間は約240秒で、神戸海洋気象台の加速度記録については、最大加速度が820galで継続時間は約30秒程度となっている。

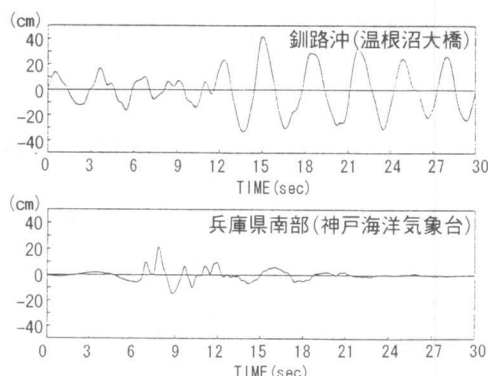
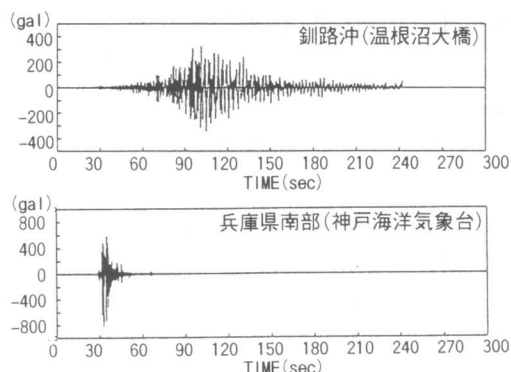
この中で、図-2に示した変位波形で見ると、温根沼大橋の最大変位は約44cmで神戸海洋気象台の最大変位は約22cmと小さくなっているが、変位の立ち上がりは、約0.2秒で最大までに達しているのが特徴であると考えられる。これは、変位は加速度の2回積分であることから考えると、加速度の立ち上がりおよびその最大値が非常に大きいことを裏付けているものと考えられる。

*1 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 室長、(正会員)

*2 (財)北海道道路管理技術センター

*3 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 研究員、(正会員)

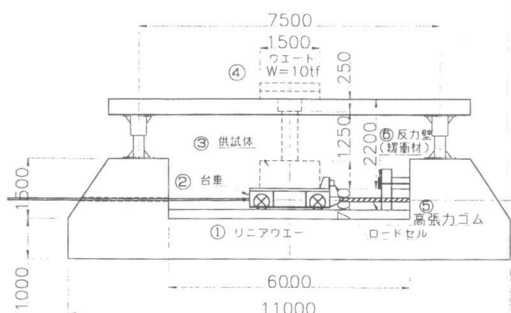
*4 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博(正会員)



3. 実験の概要

3. 1 実験方法

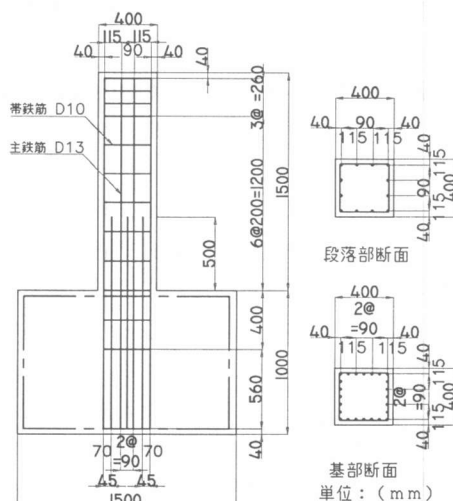
図-3に実験の概要図を示す。実験は、台車がコンクリート壁に衝突した際に供試体が台車とともに傾かないよう、不陸精度 $\pm 0.01\text{mm}$ のリニアウェーを製作し、このリニアウェーを硬質ベアリング付きの2個の鋼鉄製車輪で挟む構造とした装置を用いている。また、衝突時間を制御する目的から、衝突部には発泡スチロールを用いた緩衝工を設けており事前に時間制御のためのキャリブレーションとしての厚さを決めている。



実験の方法は、最大張力1.8tfのゴムを台車とコンクリート壁に2本取り付け、台車を引いた後、特殊な脱着装置で解放して台車をコンクリート壁に衝突させ供試体基部に加速度を入力させるようにしてある。なお、加震力はゴムの引張り長さで調整しており、20cm、30cmと徐々に引いて解放させ、最大60cm引いたところで実験を終了している。

3. 2 実験供試体

図-4に実験供試体の形状および配筋図を示した。供試体は、現時点での既設橋を参考に橋脚高さ、および鉄筋の段落とし位置を決めている。主鉄筋径はSD295A D13を用いており主鉄筋比は1.9%、帯鉄筋はD10を20cm間隔で配置している。また、上部の重りは、10tfの鉄枠で囲った鉛を死荷重としており、軸力は 6kgf/cm^2 となっている。なお、橋脚模型上部の重りは、1次モードの振動に重りの回転慣性による影響が



極力入らないよう縦・横からボルトで締めつけられる構造としているほか、橋脚頭部は鉄筋での補強を施している。また、供試体コンクリートの実験時の材令における平均圧縮強度は266 kgf/cm²、弾性係数は256,000kgf/cm²であり、また鉄筋の降伏点強度は3,000kgf/cm²と仮定している。

3. 3 計測方法

図-5に計測項目としての、センサー配置図を示した。図においてAは加速度計（容量5G）、Disは変位計、FおよびRはひずみゲージを意味している。計測は、すべてのチャンネルに関し同時A/D変換し、主要な解析をワークステーションで処理できるようにしている。なお、各チャンネルのサンプリング周波数は1KHzとした。

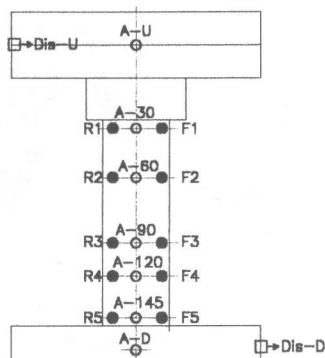


図-5 センサー位置図

4. 実験結果

4. 1 衝突時の入力加速度波形と重りの応答加速度波形

図-6(a)に台車を20cm引張った（以降これをD-20、D-30・・・と呼ぶ）位置から解放した時の重りの応答加速度波形を、図-6(b)は同じくD-50の時の応答加速度波形を示した。なお、加速度波形には微少な高周波ノイズが入っていたことから、FFTの周波数領域で10Hz以上をカットした後、逆変換したものを示している。また、図-7(a)には、D-20の時の入力加速度波形を基にした加速度応答スペクトル、図-7(b)にはD-50の加速度応答スペクトルを示した。応答スペクトル図中の実線の最上段が減衰定数0%で以下2, 5, 10, 20%の順となっている。

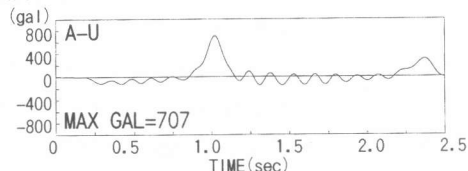


図-6(a) 応答加速度波形 (D-20)

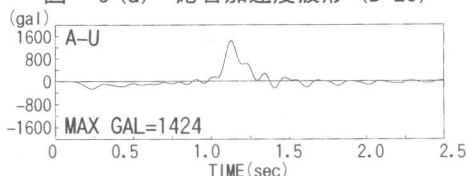


図-6(b) 応答加速度波形 (D-50)

図-6より、D-20の場合もD-50の場合も解放と同時に自由振動を行いながら移動し、自由振動が止まりかけた時に緩衝工に衝突して加速度応答を励起させているのが分かる。D-20の時の供試体の自由振動から、供試体の固有振動数は3.3Hz (0.30sec)で、自由振動時からみると減衰定数は2%程度有しているものと考えられるが、入力加速度がほぼ正弦半波であるこ

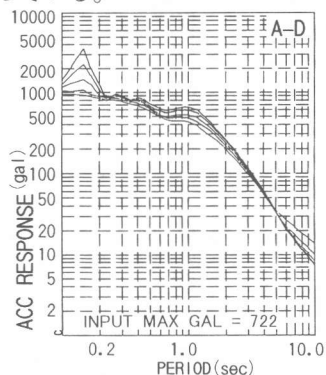


図-7(a) 応答スペクトル(D-20)

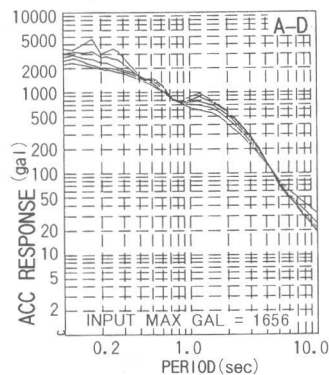
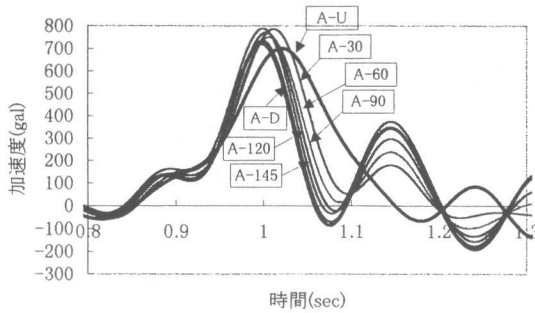
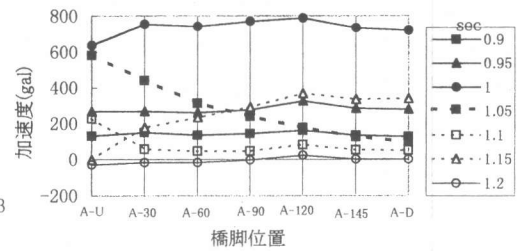


図-7(b) 応答スペクトル(D-50)

とから明確ではない。また、D-50の場合は、衝突前の自由振動時の固有振動数は繰り返し载荷で損傷を受けたことから1.8Hz (0.56sec)に低下しているほか、応答加速度は1424galで加速度応答スペクトル値によく合っている。



図－８ 時刻歴応答加速度 (D-20)



図－９ 振動モード図 (D-20)

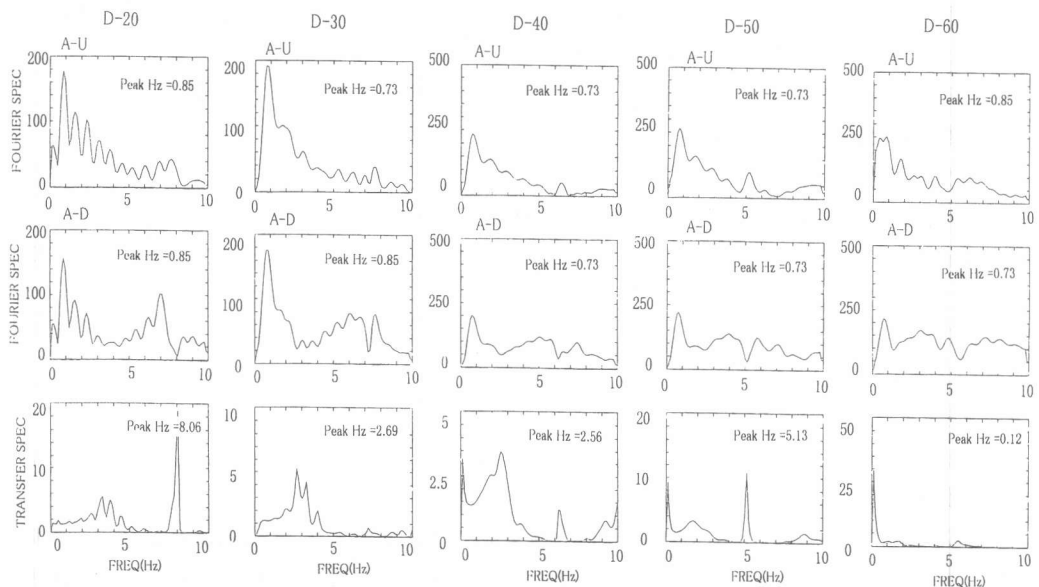
４．２ 応答時の振動モードと相対加速度

図－８にはD-20の場合の供試体フーチング下端から各点の時刻歴応答加速度を示した。図－９には、図－８で示した中で重りに生じた応答加速度と入力加速度の差が最大になる点、すなわち相対加速度が最大になる点（図－８の場合1.05sec時）を境に前後0.05sec毎の振動モードを示した。図より衝突後相対加速度が最大になるまでは剛体運動に近いモードとなっており、その後重りが不動点となって下部フーチングが衝突したコンクリート壁から離れるとき相対加速度が最大になっていることがわかる。この傾向はD-20からD-60まで同じである。

４．３ 入力加速度周波数と応答周波数の伝達関数

図－10にD-20～D-60までの伝達関数を示した。図の上段は、重りの応答加速度周波数フーリエスペクトル、中段は入力加速度周波数フーリエスペクトル、下段は前者を後者で除した伝達関数を示している。

図よりD-20の場合の増幅周波数は、3.2Hz付近、D-30で2.69Hz、というように繰り返し载荷毎に周波数が低下していくことがわかる。すなわち、一度供試体にひびわれが生じると固有振動数



図－10 各供試体の伝達関数

は大きく低下し、その後に損傷が大きくなっても低下の度合いは小さくなっていくことがわかる。なお、D-40以上の伝達関数で0.1Hz（10sec）付近に卓越振動数が生じているが、これは加速度波形にフィルター処理を施しその後に逆FFTを実行した際の軸ずれ分が残っていたためである。

また、D-20～60で5～8Hz付近に卓越した振動数が見られるが、これはFEMによる固有値解析での3次モードにはほぼ一致している。しかしながら、本実験の場合、固有値解析による1次モードの有効質量が98%で他のモードに比較し非常に大きいことから、この振動数の慣性力が供試体を破壊にいたらしめるものではないと考えられる。

4. 4 破壊状況

図-11に文献[1]による同じ供試体を用いた静的交番载荷の破壊状況と、当該実験で得られた破壊状況を示した。交番载荷時の破壊性状は、段落とし位置で供試体の幅を1Dとすれば段落としを含んで上下2Dの範囲でかぶりコンクリートが剥離し、降伏荷重以下の耐力となっている。ひびわれ性状は、段落とし部で曲げによる水平ひびわれが

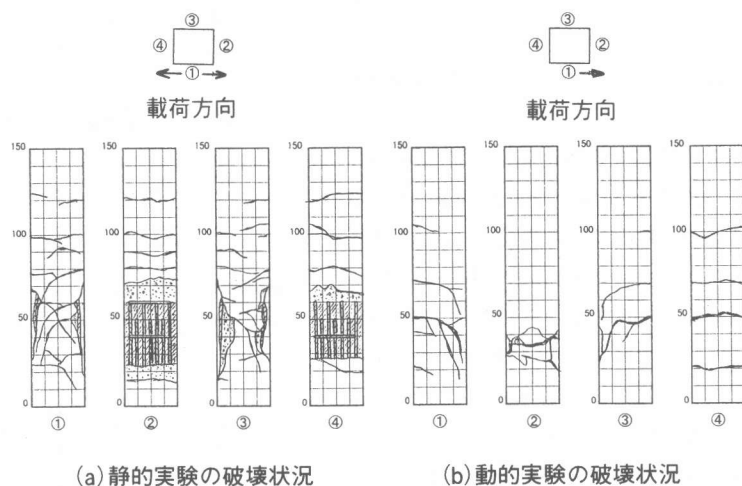


図-11 供試体の破壊状況

生じた後に図心付近から鉄筋に向かってひびわれが発達している。一方、本実験においては交番でなく一方向载荷であるが、段落とし部のひびわれ性状は同様なものとなっている。しかしながら、柱のひびわれの数は少なく損傷は段落とし部に集中する傾向となっている。

5. 考察

図-12に静的交番载荷試験時のP- δ 曲線と動の実験時のP- δ 曲線を示した。図中のP- δ 曲線の定義は以下のとおりである。

CASE1 ●-●の曲線：静的交番载荷試験の包絡線

CASE2 ○-○の曲線：荷重=測定絶対加速度×重りの質量

CASE3 ◇-◇の曲線：荷重=測定相対加速度×重りの質量

CASE4 □-□の曲線：伝達関数の卓越振動数から等価剛性を求め荷重を逆算する方法

CASE5 ■-■の曲線：荷重=入力波形の応答加速度スペクトル値×重りの質量(h=10%)

図より、絶対加速度を用いた水平力および等価剛性から逆算した荷重のうちD-40を除けば終局水平耐力は静的交番载荷試験のP- δ 曲線とはほぼ等しく、水平耐力の動の実験方法として本研究で行った手法は加速度変化率が大きい衝撃的地震動に対しても十分評価が可能であると考えられる。しかしながら、変位に関しては断面分割法で計算したものよりかなり大きな変位が生じる結果となっている。変位は、フーチングから立てた剛性が非常に高いH鋼にレーザー式変位計を取り付け相対変位を計っており、測定に関する信頼性は高いものと考えられることから、供試体下

端の角折れによるものと推察される。

塑性率に関しては、断面分割法による理論値および静的交番载荷試験を除き、供試体が破壊に至った時の水平耐力が降伏耐力より低下した点、または目視で破壊と認められた点を終局変位とした。表-1に各ケースの降伏荷重、降伏変位、終局荷重、終局変位および塑性率を示した。

表に示したとおり、動的载荷時の耐力はすべて大きく評価される値となっているが、静的交番载荷試験と評価荷重がほぼ一致するのはCASE4とCASE5である。CASE5は減衰定数の仮定により評価荷重が大きく変わる可能性があることから、CASE4の伝達関数から増幅卓越振動数を求めたのち等価剛性を求め、カンチレバーのたわみ式より荷重を逆算する方法がより適していると考えられる。また、表中には記述していないが鉄筋のひずみから平面保持の仮定でモーメントを求めて荷重を逆算する方法も比較的良好に合っている結果となっている。

なお、理論値と実験値においては水平耐力は比較的良好に合うものの、変位が大きく異なっている。これは、特に段落とし部に塑性ヒンジが形成されると曲率が非常に大きくなるためと考えられるが、本研究では詳細な検証は行っていない。

6. まとめ

本研究より以下のことが結論として導かれるが、動的交番载荷時の耐力、荷重評価方法、さらには1δyの決定方法をさらに研究していくことが重要と考えられる。

- (1) 精度の高いリニアウエーに台車と供試体を乗せ衝突時間制御のもとで衝撃的加速度入力を行う実験方法でも、橋脚等の柱部材のP-δ曲線を十分評価できること。
- (2) 繰り返し载荷時における入力加速度波形の周波数特性と応答加速度波形の周波数特性の分析から伝達関数を求めることにより、塑性域に入った橋脚等柱部材の振動特性が把握できること。
- (3) 今回の実験では、段落とし部に損傷が集中し塑性ヒンジが形成され、この点での曲率が大きくなったことから変位が計算値より大きくなったと推察されること。

参考文献

1) 佐藤昌志, 谷本俊充, 今野久志: 段落としを有するRC橋脚模型の静的交番载荷実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第51回, pp.530~531, 1996.9

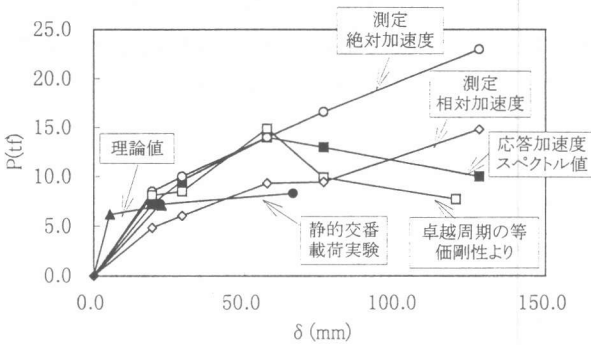


図-12 静的および動的実験時のP-δ曲線

表-1 各ケースの塑性率

	降伏荷重	降伏変位	終局荷重	終局変位	塑性率
断面分割法理論値	6.2tf	5.3mm	7.1tf	22.5mm	4.3
CASE1	8.5 tf	22.0 mm	8.7 tf	68.0 mm	3.1
CASE2	4.2 tf	19.3 mm	23.0 tf	130.0 mm以上	6.7 以上
CASE3	4.9 tf	19.3 mm	14.8 tf	130.0 mm以上	6.7 以上
CASE4	8.1 tf	19.3 mm	8.1 tf	120.2 mm	6.2
CASE5	8.5 tf	19.3 mm	10.0 tf	130.0 mm以上	6.7 以上

注) 表中 (以上) とは、レーザー変位計の設置上の測定限界値を意味する。